



УДК 69:004

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-6-18



Геологические опасности жилищной застройки участка плиоценовой террасы города Ростова-на-Дону

А.В. Гридневский ✉

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ a328@ya.ru

Аннотация

Введение. Промышленное и гражданское строительство в г. Ростове-на-Дону ведется в условиях ряда опасных геологических условий (просадочные деформации грунтов, оползни, подтопления, суффозии). Застройка новых районов в городе всегда приводит к подъему уровней грунтовых вод. Условия строительства на плиоценовой террасе в восточной части города характеризуются высоким риском подтопления из-за малой глубины залегания подземных вод, низких значений гидравлических градиентов и водопроницаемости грунтов. Сведения об актуальном режиме уровня грунтовых вод отсутствуют в печати. Целью работы является исследование факторов, определяющих баланс подземных вод, и выработка рекомендаций по мониторингу геофильтрации для сдерживания подтопления на основе материалов о геологическом строении и гидрогеологических условиях территории, а также численного гидрогеологического моделирования.

Материалы и методы. Геологическое строение и гидрогеологические условия территории анализировались по опубликованным текстовым и графическим материалам, а также результатам инженерно-геологических изысканий. Анализ геометрических параметров водоносных горизонтов, визуализация пространственных данных выполнены средствами геоинформационной системы QGIS. Для построения и анализа численных моделей геофильтрации использован программный продукт Visual Modflow компании Aquaveo.

Результаты исследования. На рассматриваемой территории в течение многих лет формировался природно-техногенный режим геофильтрации. Исследования разработанной численной гидрогеологической модели указывают на высокий риск локального подтопления, а также определяют условия распространения его на всю территорию. Оценена роль овражно-балочной сети, дренирующей водоносный горизонт и сдерживающей подтопление. Для контроля баланса подземных вод территории и уточнения параметров водоносных горизонтов разработана схема размещения сети наблюдательных гидрогеологических скважин.

Обсуждение и заключения. Сложившийся баланс подземных вод имеет хрупкое равновесие. Застройка территории с большой вероятностью будет сопровождаться дополнительной инфильтрацией техногенных вод и приведет к подтоплению. В проекте застройки должен быть предусмотрен мониторинг процесса геофильтрации и решения по дренажу грунтовых вод.

Ключевые слова: численное моделирование, геофильтрация, просадочность, подтопление, мониторинг, геологические опасности.

Благодарности. Автор выражает признательность Фоминовой Н. Н. за помощь в редактировании рукописи; благодарность Гридневскому В. Л. за помощь в работе с программным продуктом.

Для цитирования. Гридневский А.В. Геологические опасности жилищной застройки участка плиоценовой террасы города Ростова-на-Дону. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(2):6–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-6-18

Original article

Geological Hazards of Housing Development of a Pliocene Terrace Land Plot in the City of Rostov-on-Don

Alexander V Gridnevsky

Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

a328@ya.ru

Abstract

Introduction. In Rostov-on-Don the industrial and civil construction is carried out under a number of geological hazards: soils subsiding deformations, landslides, underfloodings, suffusions. Building up the new urban districts has always led to the groundwater surge. The Pliocene terrace building conditions in the eastern part of the city are characterised by the high risk of underflooding due to the shallow groundwater, low hydraulic gradients and water permeability of soils. The data on the present state of the groundwater level is not published in the media. Based on the materials on the territory geological structure and hydrogeological conditions, as well as on the numerical hydrogeological modeling, the present paper aims to investigate the groundwater balance determining factors and to develop the geofiltration monitoring recommendations for constraining the underflooding.

Materials and methods. The geological structure and hydrogeological conditions of the territory were analysed using the published reading and graphical materials, as well as the engineering and geological survey results. The aquifers' geometrical parameters analysis and the spatial data visualisation were made by means of the QGIS geographic information system. For creating and analysing the numerical geofiltration models, the Visual Modflow software product of Aquaveo company was used.

Research results. The natural and technogenic geofiltration state of the territory under investigation had been forming for many years. The study of the designed numerical hydrogeological model indicates on the high risk of local underflooding as well as defines the conditions of its spreading throughout the entire territory. The role of the ravine-gully system that drains the aquifer and constrains the underflooding has been assessed. To control the territory groundwater balance and to specify the aquifers' parameters, the layout of the observational hydrogeological wells network has been developed.

Discussion and conclusion. The existing groundwater balance is vulnerable. Building up the territory is highly likely to cause additional infiltration of technogenic water and to lead to underflooding. The territory development project should envisage the geofiltration process monitoring and groundwater draining solutions.

Keywords: numerical modeling, geofiltration, subsidence capacity, underflooding, monitoring, geological hazards.

Acknowledgements. The author expresses his appreciation to N. N. Fominova for assistance in editing the manuscript and his gratitude to V. L. Gridnevsky for the help in working with the software.

For citation: Gridnevsky AV. Geological Hazards of Housing Development of a Pliocene Terrace Land Plot in the City of Rostov-on-Don. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(2):6–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-6-18

Введение. Город Ростов-на-Дону расположен в пределах южного склона Дон-Тузловского водораздела, поверхность которого осложнена овражно-балочным рельефом. Застройка территории ведется преимущественно на лёссовых просадочных грунтах и сопровождается рядом опасных геологических процессов: подтопление, просадочные деформации грунтов, образование оползней, оврагов, развитие суффозии. Проблема нарушения режима уровней грунтовых вод (УГВ) в городе является определяющей, так как влияет на развитие указанных опасных процессов.

Неуклонный рост УГВ в населенных пунктах зависит от геологических предпосылок и техногенных причин. Последние следует рассматривать как основные, поскольку их проявление зависит от нашей жизнедеятельности. Ряд примеров указывает на развитие подтопления как в районах крайнего севера, так и в аридной зоне по самым разным сценариям: подпор водохранилищ [1, 2], влияние ирригационных систем [3, 4], паводки крупных рек [5, 23]. Подтопление происходит в районах гидрозолоотвалов ТЭЦ [6], при создании прудов на реках [7], при колебаниях уровня моря [8, 9]. Города потребляют много воды для целей водоснабжения населения. Она теряется в водонесущих коммуникациях и провоцирует подтопление [10–14], негативный вклад вносит аномальная инфильтрация атмосферных осадков [15]. Строительство также порождает ряд негативных эффектов, провоцирующих подтопление. Например, в водоносных горизонтах возникает барражный эффект при искусственном уплотнении грунта из-за отсыпки грунтовых отвалов, строительства транспортных переходов [17–19]. Городская среда

теряет устойчивость развития, если взаимодействие с подземными водами приводит к негативным результатам [16]. Наблюдения и анализ трансформации режима грунтовых вод в городской среде выполняются с применением численного моделирования [15, 16, 23, 26].

Подтопление города Ростова-на-Дону описано в работах [20–22]. Среди причин подъема УГВ первое место занимают потери из сети водонесущих коммуникаций. Ущерб проявляется в многочисленных деформациях зданий и сооружений, оползневых смещениях грунтов. При повышении УГВ изменяется влажность грунтов и их деформационно-прочностные свойства. Для сдерживания этих процессов необходима система мониторинга режима подземных вод. Ее создание актуально как для застроенных, так и для вновь осваиваемых территорий. Примером является высокий риск развития подтопления при жилищном строительстве на плиоценовой террасе реки Дон в восточной части г. Ростова-на-Дону на территории бывшего аэропорта (далее — Аэропорта). Составной частью мониторинга является имитационное численное моделирование динамики подземных вод, позволяющее исследовать зависимость режима геофильтрации от природно-техногенных факторов и получать информацию для выработки инженерных решений по сдерживанию опасных геологических процессов.

Целью статьи является анализ сложившихся инженерно-геологических условий территории Аэропорта, гидродинамического режима подземных вод, построение численной модели геофильтрации, исследование с ее помощью факторов, провоцирующих подтопление, и выработка рекомендаций по мониторингу режима водоносного горизонта и сдерживания подтопления.

Материалы и методы. Анализ инженерно-геологических условий выполнен по материалам изысканий прошлых лет в городе Ростове-на-Дону с использованием опубликованных данных, государственных геологических карт и численного моделирования геофильтрации с применением программного продукта Visual Modflow компании Aquaveo, а также инструмента обработки картографических материалов QGIS 3.12.

Опасные геологические процессы в Ростове-на-Дону проявляются в подъеме уровней грунтовых вод, суффозии, склоновых процессах, деформациях лессовых грунтов при замачивании. Все это приводит к нарушениям конструкций зданий и сооружений. Подтопление в городе закономерно формировалось вслед за развитием водонесущей инфраструктуры. Так в 1911 году в водопроводную сеть закачивалось 20 тыс. м^3/сут, в 1960 году — 120 тыс. м^3/сут, в 2013–2017 годы среднегодовая подача воды достигла 470 тыс. м^3/сут. К 2018 году в водопровод поступало 434 тыс. м^3/сут (включая подачу 27 тыс. м^3/сут для г. Батайск и г. Аксай), объем потерь в сетях составлял 36 %.

К 2018 году очистные сооружения канализации имели протяженность 1400 км и принимали на очистку из города 175 тыс. м^3/сут. Часть воды находилась в замкнутом цикле водооборота предприятий. Объемы водоотведения не превышали 50 % суммарного потребления воды. Можно полагать, что значительный объем воды инфильтруется в грунт.

Изменения в режиме водоносных горизонтов происходили в зависимости от сложившихся гидрогеологических условий, интенсивности и объема инфильтрации техногенных вод. Процесс подтопления наиболее активно развивался в районах крупных промышленных предприятий, очистных сооружений АО «Ростовводоканал», изношенных участков сетей водоснабжения, водоотведения, теплотрасс, ливневой канализации. В городе существует опыт активной застройки новых районов с 1963 года: Западный жилой массив, Северный жилой массив, жилой массив Александровка, микрорайоны Левенцовский, Суворовский, Красный Аксай, Вересаево. Количество частных потребителей воды увеличилось до 610 тыс. человек, а расчетные объемы подаваемой воды возросли на 122 тыс. м^3/сут. В большей части указанных районов произошло подтопление. По данным режимных наблюдений ОАО «РостовДонТИСИЗ» локальная скорость подъема УГВ составила 0,2–0,5 м/год [21].

Можно сделать вывод о прямой связи водоснабжения, водоотведения и подтопления в городе Ростове-на-Дону. В этом аспекте важно рассмотреть один из проектов новой застройки участка плиоценовой террасы реки Дон в восточной части города на территории Аэропорта. Выбранная территория охватывает 368 га с размещением 2,92 млн. м^2 недвижимости для 66 тыс. жителей. Здесь существует высокий геологический риск подтопления. Рассмотрим его составляющие.

1. Физико-географические условия. Территория застройки расположена в восточной части города, у северного шва плиоценовой террасы реки Дон, и ограничена глубокими речными врезами реки Дон, балок: Кизитериновской, Кобяковской и Пороховой. Она представляет собой водораздельное межбалочное пространство с абсолютными отметками +60–80 м. Овражно-балочная сеть незначительно изменена инженерными сооружениями Аэропорта. Климат умеренно-континентальный, среднемноголетнее количество осадков — 570 мм. Самым теплым месяцем является июль (+23,6 °С), наиболее холодный — январь (–4,2 °С). Часть территории (12 %) имеет искусственное покрытие, что уменьшает инфильтрацию атмосферных осадков и эвапотранспирацию. Постоянными водотоками являются река Дон и ручьи балок Кизитериновской и Пороховой. Основными источниками питания ручьев являются атмосферные осадки и подземные воды. Территория Аэропорта расположена высоко относительно эрозионных врезов (+55 м) и не чувствительна к колебаниям уровня воды (1–2 м) в реке Дон.

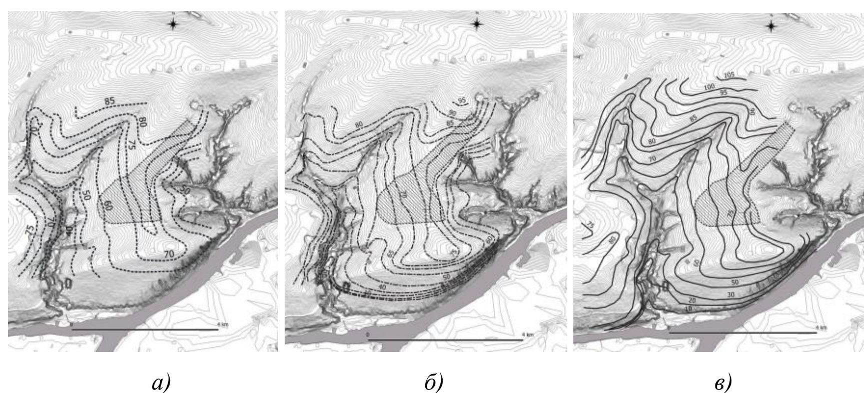
2. Геологическое строение. В пределах рассматриваемой площади выделены отложения морского и терригенного происхождения. Самые древние горные породы представлены плотными морскими глинами сарматского региояруса (N_1s_1). Они являются региональным водоупором, залегают нормально, имеют кровлю на абсолютных отметках +16–18 м и мощность 10–15 м. Над глинами расположен комплекс водопроницаемых трещиноватых известняков сарматского региояруса (N_1s_2), переслаивающихся с песчаниками, песками, а также трещиноватыми и пористыми известняками мэотического (N_1m) и понтического региоярусов (N_1p). Кровля водопроницаемых неогеновых отложений расположена субгоризонтально на абсолютных отметках +35 м. Частично она замещена широтным врезом аллювиальных песчано-глинистых отложений хапровской свиты (N_2hp) мощностью до 5 м. Четвертичная толща начинается с эоплейстоценовых красно-бурых, плотных и водонепроницаемых скифских глин (Q_Esk) с кровлей на абсолютных отметках +55–57 м и мощностью 15–20 м. Скифские глины встречаются повсеместно в Ростове-на-Дону за исключением врезов оврагов и балок, где они размыты. Глины вскрыты под всей территорией Аэропорта. Неоплейстоцен-голоценовые отложения представлены эолово-делювиальными суглинками ($vdQ_{II\text{-}IV}$). Мощность четвертичной толщи достигает 30–35 м. В суглинках выделены три погребенные почвы, залегающие с интервалом 2–3 м: лихвинская ($eQ_{III}v$) темно-коричневая, каштанового типа (1,2–1,5 м); микулинская ($eQ_{III}mk$) темно-бурого цвета (1,0–1,3 м); молого-шекснинская ($dQ_{III}ml$), темно-бурая и буровато-серая (0,8–1,3 м). Погребенные почвы — это слабопроницаемые тяжелые суглинки и глины. Кровля самой молодой погребенной почвы расположена на глубине 6,0–6,5 м. Ее сменяют неоплейстоценовые (vdQ_{III}) эолово-делювиальные лёссовидные суглинки. Они представляют опасность для эксплуатации зданий и сооружений, поскольку при замачивании проявляют просадочные деформации.

3. Гидрогеологические условия. В ходе неоген-четвертичной геологической истории на территории проектируемого строительства сформировалась геологическая структура, включающая два водоносных горизонта. Первый является межпластовым и включает морские песчаники, пески и известняки миоцен-плиоцена. Водоупором служат плотные глины сарматского региояруса (N_1s) с абсолютными отметками +14–16 м, кровлей – красно-бурые скифские глины (Q_Esk), с отметками подошвы +37–42 м. Режим водоносного горизонта безнапорный. Большая часть свободной поверхности воды в городе располагается на высоте 20–25 м над уровнем моря. Воды дренируются балками, оврагами, разгружаются в виде источников на отметках +15–20 м.

Второй водоносный горизонт располагается в четвертичных суглинках и является грунтовым. Водоупором для него служат скифские глины, кровля которых имеет пологий рельеф с перепадом абсолютных отметок +53–55 м. Мощность водонасыщенного слоя на водораздельных пространствах составляет 25 м. На склонах балок она уменьшается до 15 м и выклинивается к тальвегам. На территории застройки свободная поверхность подземных вод установилась на абсолютных отметках +65–90 м.

Режим подземных вод определяется несколькими факторами: атмосферными осадками, техногенной инфильтрацией от Аэропорта и примыкающих к территории районов, эвапотранспирацией, а также разгрузкой через борта оврагов и балок: Кобяковской, Пороховой и Кизитериновской.

Поверхность УГВ в пределах застраиваемой территории установилась в 2000 году на глубине 6–7 м и представляла собой куполообразное поднятие, вытянутое в меридиональном направлении, с максимальными отметками (+90 м) в северной части территории Аэропорта и минимальными (+60–70 м) – в южной. Залегающие с востока и запада крупные балки (Кобяковская, Пороховая, Кизитериновская), дренируют водоносный горизонт и определяют морфологию рельефа поверхности УГВ. Рассматриваемая территория три раза включалась в область гидрогеологического картирования Ростова-на-Дону. Поэтому существует возможность оценить динамику водоносного горизонта (рис. 1).



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Гидроизогипсы территории Аэропорта: *а* — в 1975 г.; *б* — в 1988 г.; *в* — в 2000 г.

С 1975 года уровень подземных вод медленно поднимался. Поверхность УГВ представляла собой область с абсолютными отметками +60–75 м, вытянутую с севера на юг вдоль всей территории Аэропорта. С южной стороны область сопрягалась с куполом подтопления (+70 м) в жилом районе Александровка. С севера на территорию Аэропорта поступали грунтовые воды (+80 м) от зоны подтопления завода «Алмаз» [21]. В 1988 году поверхность УГВ с отметками +75 м продвинулась к южной границе Аэропорта и объединилась с куполом грунтовых вод в жилом районе Александровка, также поднявшимся до +75 м. К 2000 году абсолютные отметки поверхности грунтовых вод возросли незначительно. С южной стороны Аэропорта продолжал расширяться обширный купол подтопления (+75 м). В северной части территории уровни воды продолжали повышаться, образуя клинообразный поток с абсолютными отметками УГВ +80–85 м. Таким образом, территория Аэропорта испытывала медленный рост УГВ, преимущественно в северной части.

Особенность инженерно-геологических условий заключается в близости природного УГВ (6–7 м) к поверхности земли, низких гидравлических уклонах потоков и анизотропии фильтрационных свойств лессовых грунтов. Водопроницаемость лессовых грунтов в вертикальном направлении составляет 0,6–0,8 м/сут [10], в горизонтальном — в 5–7 раз меньше, что провоцирует быстрый рост УГВ в виде куполов в местах локальных потерь воды.

Для получения ответов о возможности своевременного обнаружения и мониторинга локального подъема УГВ, а также условий формирования тотального подтопления, разработаны и исследованы численные модели геофильтрации.

Построение модели-1. Для анализа локального подтопления разработана модель, описывающая фрагмент водоносного горизонта. С этой целью рассмотрен безграничный бассейн грунтовых вод, в котором с поверхности земли от локального источника инфильтруется вода. На поверхности водоносного горизонта образуется купол, который растет вверх и растекается в стороны по мере насыщения грунтов водой. Расчеты выполнены решением уравнения Буссинеска, описывающего геофильтрацию. С этой целью применен метод конечных разностей, реализованный средствами программы Visual Modflow. Задача решается с использованием ортогональной сетки, 100×100 элементов, с шагом на периферии — 100 м, а в зоне инфильтрации — 10–20 м. В плане она имеет форму прямоугольника с шириной сторон 3000 м. По вертикали модель включает 14 горизонтальных слоев мощностью 1,0 м для лучшей сходимости решения и более точного отслеживания динамики УГВ (рис. 2). Приток со стороны границ отсутствует, восточная и западная границы имитируют балки и моделируются как дрены, расположенные на уровне грунтовых вод. Абсолютная отметка верхней границы толщи составляет +14,0 м, подошвы — 0,0 м, режим фильтрации безнапорный. Значения коэффициентов фильтрации выбраны на основе полевых изысканий в Ростове-на-Дону [21] и исследований цифровых моделей [11, 22]. Горизонтальный коэффициент фильтрации принимается $К_ф(x, y)$ = 0,1 м/сут, вертикальный — $К_ф(z)$ = 0,6 м/сут. Начальный уровень свободной поверхности воды установлен на отметке +7 м (слои 9–14), зона аэрации моделируется безводными слоями 1–8.

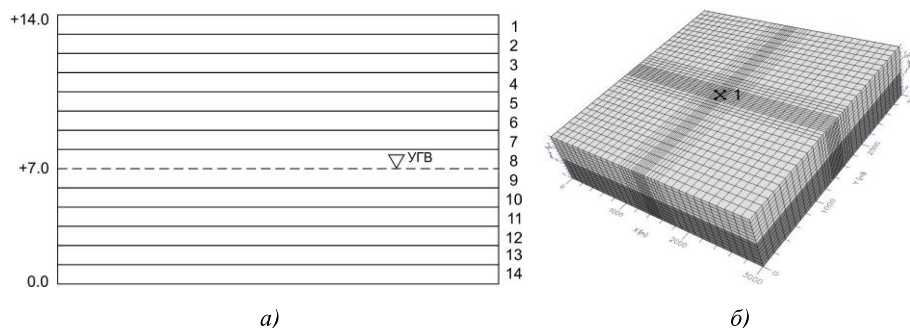
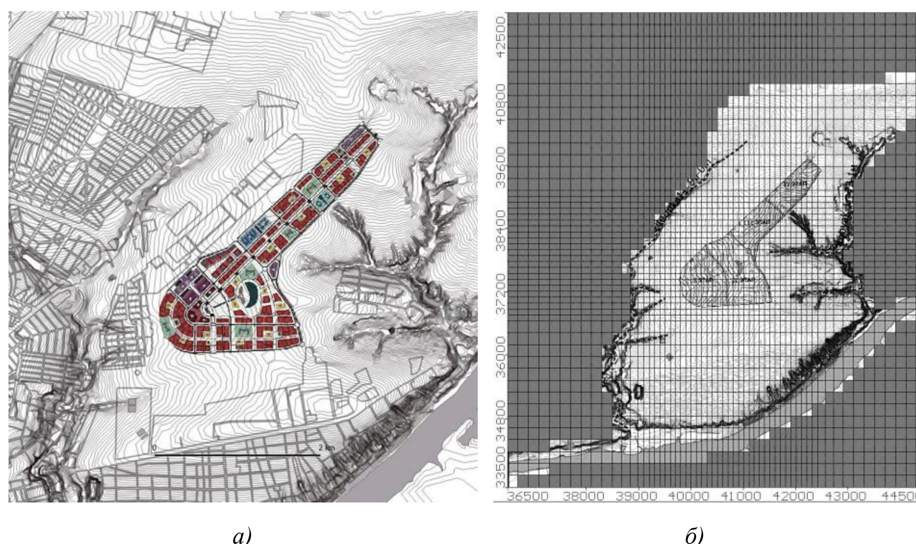


Рис. 2. Схема сеточной гидрогеологической модели в разрезе и плане:
а — вертикальный разрез модели с указанием слоев и УГВ; *б* — площадка инфильтрации
(темный тон – водонасыщенная толща, светлый – зона аэрации)

Поступление воды имитировалось площадным питанием в центре верхнего слоя через группу ячеек суммарной площадью 360 $м^2$. Решение задачи выполнено в нестационарном режиме фильтрации для расчетного периода 1825 суток, разделенного на 10 шагов. Решение выполнено с применением пакета PCG (Preconditioned Conjugate-Gradient) Modflow. В нашем случае существует неопределенность в оценках интенсивности потери воды на поверхности земли. С учетом этого обстоятельства выполнены многовариантные расчеты, позволяющие оценить скорость подъема УГВ в зависимости от интенсивности инфильтрации, значение которой последовательно изменялось: 10, 20, 50, 100 $м^3$/сут.

Построение модели-2. Вторая модель описывала структуру природного объекта. Область модели площадью 25 км^2 ограничена руслом реки Дон (юг), балкой Кизитериновской (запад), Кобяковской и Пороховой (восток) (рис. 3). Северная граница проведена по водоразделу поверхности подземных вод и рельефа. Пространство модели дискретизировано с переменным шагом от 200 м на периферии и до 80 м — в центральной части.

В вертикальной структуре модели выделен нормально залегающий водопроницаемый слой неогеновых отложений песчаников и известняков мощностью 40 м. Он сменяется по вертикали водонепроницаемой толщей скифских глин мощностью 10–15 м с кровлей, плавно снижающейся в юго-западном направлении от +55 до +50 м. Кровля служит подошвой безнапорного водоносного горизонта четвертичных отложений. Поверхность земли является верхней границей четвертичных суглинков с абсолютными отметками на территории Аэропорта +95–65 м, а в пределах границ модели — от +120 м в северной части до +1 м у берега реки Дон.



а) *б)*

Рис. 3. Схематизация территории исследования: *а* — существующая застройка, в центре выделена территория Аэропорта; *б* — сетка дискретизации грунтового массива (темный цветовой тон – ячейки, неактивные в модели)

Природные условия схематизированы, заданы граничные и начальные условия модели. С запада и востока границами модели являются дрены, которые имитируют балки — это граничные условия III-рода, которые принимают воду, если напор выше их отметок, и отдают, если он опускается ниже. С юга река моделируется граничным условием I-рода, с постоянными значениями уровня воды. Граница с севера принята водонепроницаемой. Абсолютные отметки поверхности земли заданы на основании карты горизонталей (М1:10000). Геометрические параметры поверхностей неогеновых отложений и скифских глин оцифрованы средствами геоинформационной системы QGIS по геологическим и гидрогеологическим картам. Сформирован набор файлов, содержащих пространственные координаты точек, описывающих морфологию поверхности земли, литологические границы и распределение УГВ. Полученные данные импортировались в пространство цифровой гидрогеологической модели средствами Visual Modflow, и выполнялось решение уравнения Буссинеска, представляющего распределенные в пространстве и времени значения гидростатических напоров. Модель системно описывает динамику подземных вод и является наиболее удачным инструментом для ее изучения.

В настоящее время доступ к результатам актуальных гидрогеологических исследований ограничен. Поэтому фильтрационные параметры модели приняты на основании ранее выполненных исследований на цифровых моделях и опубликованных материалов об изысканиях ОАО «РостовДонТИСИЗ» [11, 21, 22]. Коэффициент фильтрации установлен для дрен $К_Ф$ = 0,1 м/сут, ложа реки — $К_Ф$ = 0,1 м/сут. Значения водопроницаемости для четвертичных отложений составляют $К_ф(x, y)$ = 0,1 м/сут по горизонтали и $К_ф(z)$ = 0,6 м/сут по вертикали. Скифские глины заданы слабо водоупорными ($К_ф$ = 0,005 м/сут), для межпластового водоносного горизонта водопроницаемость принята $К_ф$ = 40 м/сут. Большие перепады гидростатических напоров по площади учтены вертикальной дискретизацией модели с шагом 2–5 м и заданием 10 расчетных слоев в интервале четвертичных отложений. Коэффициент водоотдачи принят равным 0,2. Инфильтрация воды в грунт предварительно принята в интервале 300–400 мм/год.

Идентификация параметров модели выполнена подбором значений при многовариантном решении имитационных задач. Моделирование выполнено в стационарном режиме фильтрации. Критерием адекватности мо-

дели является минимальное расхождение значений гидростатических напоров с картой гидроизогипс, построенной ОАО «РостовДонТИСИЗ» за 2000 год.

Результаты исследования. В ходе моделирования имитировалась локальная инфильтрация и оценивались скорость подъема купола грунтовых вод и границы его растекания. Установлено, что при точечных потерях воды вершина купола УГВ установится на глубине 5 м через 4, 14 и 60 месяцев при инфильтрации в объеме 20, 10, 5 м^3/сут соответственно. При локальных потерях воды менее 2 м^3/сут подтопление не реализуется, и по истечении 5 лет купол стабилизируется на глубине 6,5 м. В ходе расчетов регистрировалось расстояние, на которое растекается купол подземных вод с превышением над УГВ на 0,1 м. В таблице 1 видно, что обводнение при локальных потерях вод развивается компактно.

В первый месяц инфильтрации изменения в водоносном горизонте можно заметить на расстоянии менее 25–40 м. На четвертом месяце они проявятся на расстоянии 50–70 м от очага. Следует уделить внимание второй часть таблицы с расчетами для грунтов с изотропными фильтрационными свойствами (К$_ф$*(x, y, z)* = 0,6 м/сут). Расчетные радиусы куполов подтопления увеличились на 30 %. Критически высокий уровень подземных вод достигается на 2 и 4 месяцы при существенно больших объемах инфильтрации: 100 и 50 м^3/сут соответственно.

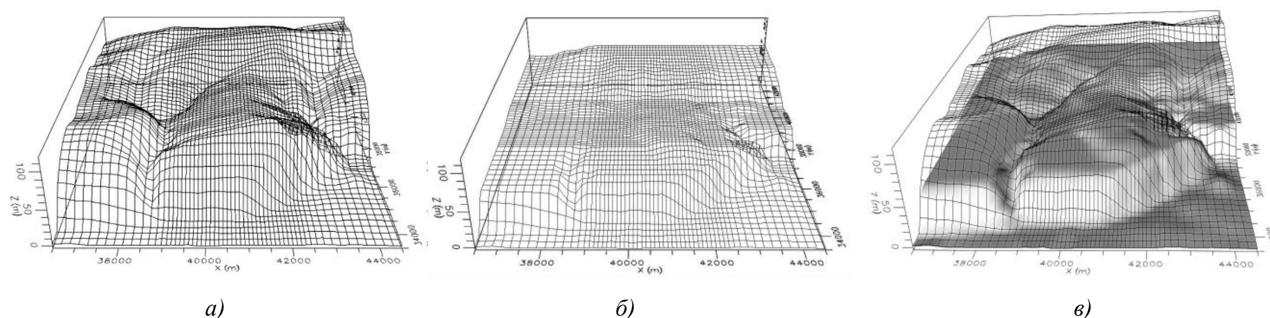
Таблица 1

Радиус купола УГВ при локальной инфильтрации воды

Период инфильтрации, мес.	Интенсивность инфильтрации, м^3/сут			
	5	10	20	50
	Радиус купола, м			
К$_ф$*(z)* = 0,6 м/сут, К$_ф$*(x, y)* = 0,1 м/сут				
1	25	34	42	–
2	38	47	57	–
4	50	60	70	–
К$_ф$*(x, y, z)* = 0,6, м/сут				
1	20	38	53	74
2	40	54	75	97
4	40	78	90	128

Толща изотропных грунтов менее чувствительна к обводнению. Согласно расчетам для подтопления в изотропных грунтах за 4 месяца требуется в 2,5 раза больше объема воды, чем в анизотропных. При инфильтрации 20 м^3/сут подтопление не реализуется, а УГВ через пять лет установится на глубине 5,8 м.

На второй модели имитировалась динамика водоносного горизонта на всей территории предполагаемого строительства. Пространственная структура толщи (рис .4) показывает значительные изменения мощности четвертичных отложений по площади. Она максимальна на водоразделе (20–25 м), уменьшается на склонах и выклинивается внутри балок. Это означает, что грунтовые воды дренируются эрозионными врезами, особенно хорошо в тех местах, где размыты скифские глины.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Топография территории строительства: *а* — поверхность земли; *б* — кровля скифских глин; *в* — совмещение двух поверхностей

На рис. 5 видна тесная взаимосвязь конфигурации гидроизогипс и морфологии поверхности скифских глин. Поверхность подземных вод неотвратимо понижается с приближением к эрозионным депрессиям в глинах. Они являются одним из главных факторов режима грунтовых вод.

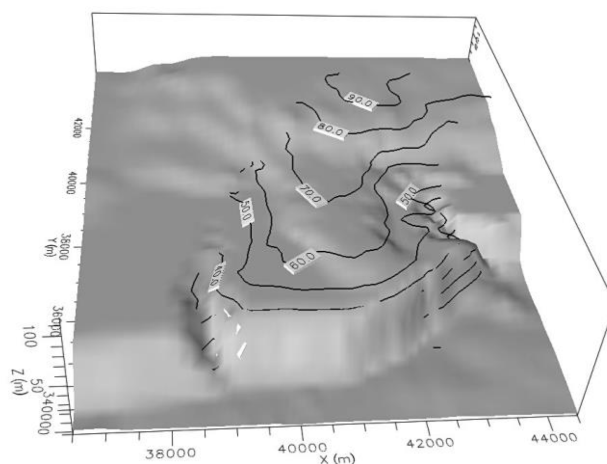
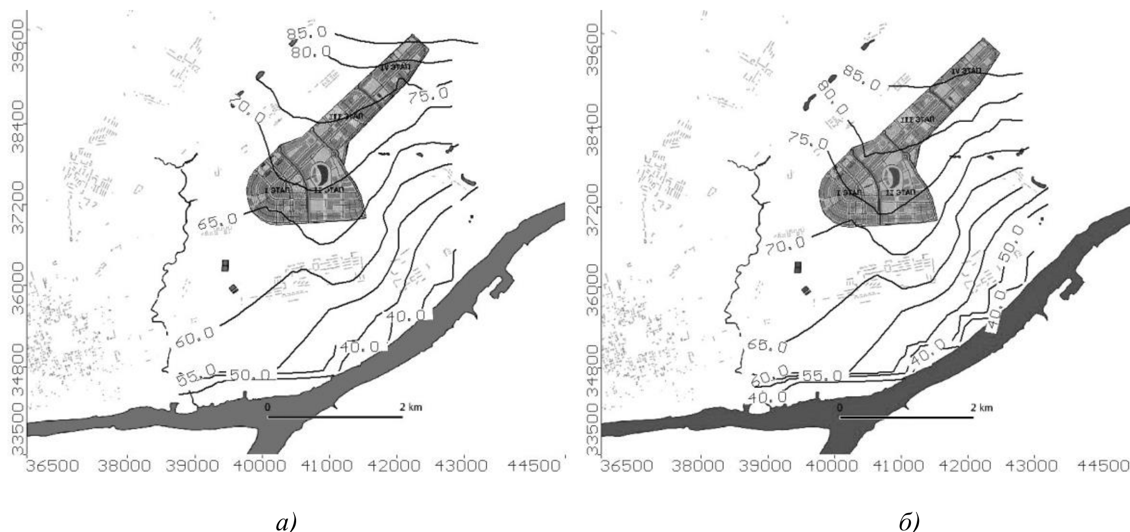


Рис. 5. Положение линий гидроизогипс (сплошные линии) над поверхностью скифских глин

Структура потока имеет особенности: преобладает направление с севера на юг с минимальными уклонами I = 0,006 и скоростью движения воды V = 0,22 м/год. В широтном направлении поток сжат дренирующим влиянием балок, на склонах балок скорость потока увеличивается до 3,5 м/год.

Расчеты показывают, что етстественные дрены в виде балок и оврагов поглощают 22 % общего стока подземных вод, остальная часть разгружается в реку. Отключение на модели дрен приводит к повышению расчетного значения УГВ территории Аэропорта на 5 м.

Вторым аспектом гидродинамики территории являются масштабы развития подтопления. Расчеты на модели показывают (рис. 6): увеличение объема инфильтрации на 10 % достаточно для подъема УГВ в пределах всей территории на 5 метров, что приводит к подтоплению.



а) *б)*

Рис. 6. Положение УГВ на территории Аэропорта: *а* — фоновое значение инфильтрации;
б — при увеличении инфильтрации на 10 %

Учитывая один из вариантов застройки, а также сложившиеся гидрогеологические условия, целесообразно разместить сеть наблюдательных скважин, обеспечивающих систематический контроль режима грунтовых вод (рис. 7). Мониторинг УГВ необходим для оценки влияния источников подтопления, расположенных за пределами территории, и очагов потерь воды на территории застройки. Скважины размещаются в районах скопления зданий для раннего обнаружения локальных утечек, а по северному и южному контурам территории – для контроля изменения УГВ со стороны жилого района Вересаево, АО «Алмаз» и ремонтного предприятия.



Рис. 7. Схема размещения наблюдательных гидрогеологических скважин

Сеть скважин должна развиваться последовательно за этапами реализации строительства. Контроль УГВ целесообразно осуществлять автоматическими датчиками с передачей данных в сеть Интернет [27].

Обсуждение и заключения. Геологические предпосылки способствуют подъему УГВ, но провокатором процесса являются исключительно техногенные причины. Разработанная численная модель геофильтрации позволила исследовать баланс подземных вод на участке плиоценовой террасы и сделать выводы о возможности подтопления при техногенных нагрузках. Она должна актуализироваться по мере накопления материалов инженерно-геологических изысканий.

Полученные результаты позволяют сформулировать требования к мониторингу водоносного горизонта на застроенной территории. В соответствии с СП 104.13330. 2016 массив грунтов считается подтопленным при подъеме УГВ на глубину 3–5 метров. Если расстояние между наблюдательными скважинами не превышает 50–70 м, то возможность регистрации аномалий УГВ появится через 2–4 месяца. Однако формирование детальной сети наблюдательных скважин требует дополнительных затрат. Уменьшение их числа возможно за счет размещения в местах наиболее вероятного проявления очагов потерь воды. Для оперативного анализа гидродинамического режима на территории Аэропорта целесообразно разместить примерно 40 наблюдательных гидрогеологических скважин.

Расчеты показывают необходимость уточнения фильтрационных параметров в ходе опытно-фильтрационных работ. Из-за низкой водопроницаемости грунтов значительную долю испытаний должны составлять наливы воды в скважины. В численных экспериментах соотношение вертикального и горизонтального коэффициентов фильтрации принято $К_ф(z)/ К_ф(x, y) = 6$. При меньших значениях коэффициента процесс подтопления будет замедлен.

Морфология рельефа и литологических границ оказывают решающее влияние на движение подземных вод. Поэтому в ходе строительства и эксплуатации территории необходимо обеспечить доступность разгрузки подземных вод в рельефе. Засыпка понижений рельефа обязательно должна сопровождаться устройством дренажа. Лучшим подходом является устройство зон рекреации. Как показывают расчеты, блокирование дренирующей способности дрен приводит к подтоплению.

Согласно проведенных расчетов, увеличение инфильтрационного питания на 10 % приводит к подтоплению. Время его возникновения определяется ответственностью эксплуатантов территории и может вообще не наступить. Однако опыт функционирования вновь застроенных районов города указывает на период в среднем 2–3 года.

Если на территории произойдет подъем УГВ, то обратное его снижение будет крайне медленным и только за счет оттока в широтном направлении. Это означает, что при застройке территории необходимо максимально снизить барражный эффект фундаментов для беспрепятственного оттока воды в направлении «восток-запад».

Полученные результаты согласуются с выполненными ранее гидрогеологическими исследованиями в Ростове-на-Дону. Они дополняют информацию, необходимую для поиска решений по инженерной защите территории.

Список литературы

1. Каманина И.З., Каплина С.П., Макаров О.А., Кликодуева Н.А. *Комплексная оценка экологического состояния наукограда Дубна*. Дубна: ОИЯИ; 2019. 168 с.

2. Никаноров А.М. Барцев О.Б., Барцев Б.О. Техногенное подтопление на территории юга России в Ростовской области. *Известия РАН. Серия географическая*. 2009;1: 1–11. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_11695694_24019601.pdf

3. Таджибаева Н.Т., Мавлянова Н.Г. *Исследование свойств и состояния грунтов в основании древних памятников архитектуры г. Бухара*. В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). Москва: ГеоИнфо; 2022. С. 124–127.

4. Awad S.R., el Fakharany Z.M. Mitigation of waterlogging problem in El-Salhiya area. *Water Science*. 2020;34(1):1–12. https://doi.org/10.1080/11104929.2019.1709298

5. Павлова Н.А. Данзанова М.В., Огонеров В.В. *Особенности взаимосвязи поверхностных и подземных вод на пойменно-намывной территорий г. Якутска*. В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). Москва: ГеоИнфо; 2022. С. 110–116.

6. Красовская И.А., Галкин А.Н. *Техногенные грунты на территории г. Витебска и геоэкологические аспекты их изучения*. В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). Москва: ГеоИнфо; 2022. С. 364–371.

7. Заиканов И.Н. Заиканова Е.В., Булдакова И.А. *Геоэкологический и ландшафтно-экологический анализ территорий существующих свалок ТБО Московской области.* В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). Москва: РУДН; 2018. С. 65–70.

8. Hill K., Henderson G. Pond Urbanism: Floating Urban Districts on Shallow Coastal Groundwater. *WCFS2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;158: 23–42. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2256-4_2

9. Luoma S., Okkonen J. Impacts of future climate change and Baltic Sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko aquifer in southern Finland. *Water (Switzerland)*. 2014;6(12): 3671–3700. https://doi.org/10.3390/w6123671

10. Krogulec E., Małecki J., Porowska D., Wojdalska A. Assessment of Causes and Effects of Groundwater Level Change in an Urban Area (Warsaw, Poland). *Water*. 2020;12(11): 3107. https://doi.org/10.3390/w12113107

11. Гридневский А.В. Численное моделирование геофильтрации правобережья реки Дон для обоснования инженерной защиты от подтопления в г. Ростове-на-дону. *Геология и геофизика Юга России*. 2019;9(1): 150–163.

12. Vázquez-Suñé E., Carrera J., Tubau I., Sánchez-Vila X., Soler A. An approach to identify urban groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2010;14(10): 2085–2097. https://doi.org/10.5194/hess-14-2085-2010

13. Yao Y., Zhang M., Deng Y., Dong Y., Wu X., Kuang X. Evaluation of environmental engineering geology issues caused by rising groundwater levels in Xi'an, China. *Engineering Geology*. 2021;294. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106350

14. Allocca V., Silvio C., Pantaleone De V., Raffaele V. Rising groundwater levels and impacts in urban and semirural are around Naples (southern Italy). *Rendiconti Online Societa Geologica Italiana*. 2016;41:14–17. http://dx.doi.org/10.3301/ROL.2016.81

15. Locatelli L., Mark O., Mikkelsen P.S., Arnbjerg-Nielsen K., Deletic A., Roldin M., Binning J.P. Hydrologic impact of urbanization with extensive stormwater infiltration. *Journal of Hydrology*. 2017;544: 524–537. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.030

16. La Vigna F. Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeol. J*. 2022;30:1657–1683. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1

17. Огородникова Е.Н., Николаева С.К. *Изменение геологической среды под воздействием массивов техногенных грунтов – отходов промышленного производства*. В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (22 марта 2018 г.). Москва: РУДН; 2018. С. 137–142.

18. Yihdego Y., Danis C., Paffard A. Groundwater engineering in an environmentally sensitive urban area: Assessment, landuse change/infrastructure impacts and mitigation measures. *Hydrology*. 2017;4(3). https://doi.org/10.3390/hydrology4030037

19. Килин И.Ю. *Влияние нового строительства на подтопление г. Перми*. В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2–4 апреля 2019 г.). Сборник научных трудов под ред. В. И. Осипова и др. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т; 2019. Вып. 21. С. 190–195.

20. Приваленко В.А., Безуглова О.С. Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области. В кн.: *Экология города Ростова-на-Дону*. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНВШ; 2003. Т. 1. 290 с.

21. Меркулова К.А. *Инженерно-геологические условия г. Ростова-на-Дону.* Ростов-на-Дону: Изд-во РГПУ; 2006. 132 с.

22. Гридневский А.В. *Имитационное гидрогеологическое моделирование при поиске решений реабилитации техногенно-нарушенного режима грунтовых вод г. Ростова-на-дону.* В: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2–4 апреля 2019 г.). Сборник научных трудов под ред. В. И. Осипова и др. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т; 2019. Вып. 21. С. 162–172.

23. Červeňanská M., Baroková D., Šoltész A. Rye Island, 2010: Impact of the flooding on the groundwater level. *Pollack Periodica*. 2021;16(3):70–75. https://doi.org/10.1556/606.2021.00357

24. Chiang W-H., Kinzelbach W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Berlin: Springer; 2000. 342 p.

25. Barnett B., Townley L.R., Post V., et al. *Australian Groundwater Modelling Guidelines, Waterlines report.* Canberra: National Water Commission; 2012. 203 p.

26. Wels Ch., Geo P., Mackie D., Scibek J. *Guidelines for Groundwater Modeling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities*. Toronto: Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting (Canada) Inc; 2012. 385 p.

27. Ткаченко И.Г., Шатохин А.А., Гераськин В.Г., Кислун А.А. Автоматизированная система сбора и передачи данных с гидрогеологических наблюдательных скважин. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2013;5:18–22.

References

1. Kamanina IZ, Kaplina SP, Makarov OA, Klikodueva NA. *Kompleksnaya ocenka ehkologicheskogo sostoyaniya naukograda Dubna*. Dubna: Joint Institute for Nuclear Reasearch; 2019. 168 p. (In Russ.).

2. Nikanorov AM, Barcev OB, Barcev BO. Tekhnogennoe podtoplenie na territorii yuga Rossii v Rostovskoj oblasti. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2009;1:1–11. Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_11695694_24019601.pdf (In Russ.).

3. Tadzhibaeva NT, Mavlyanova NG. *Issledovanie svojstv i sostoyaniya gruntov v osnovanii drevnikh pamyatnikov arkhitektury g. Bukhara.* In: Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (31.03 – 1.04.2022). Moscow: "GeoInfo"; 2022. P. 124–127. (In Russ.).

4. Awad SR, el Fakharany ZM. Mitigation of waterlogging problem in El-Salhiya area. *Water Science*. 2020;34(1):1-12. https://doi.org/10.1080/11104929.2019.1709298

5. Pavlova NA, Danzanova MV, Ogonerov VV. *Osobennosti vzaimosvyazi poverkhnostnykh i podzemnykh vod na pojmenno-namyvnoj territorij g. Yakutska*. In: Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (31.03 – 1.04.2022). Moscow: "GeoInfo"; 2022. P. 110–116. (In Russ.).

6. Krasovskaya IA, Galkin AN. *Tekhnogennye grunty na territorii g. Vitebska i geoehkologicheskie aspekty ikh izucheniya*. In: Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (31.03 – 1.04.2022). Moscow: "GeoInfo"; 2022. P. 364–371. (In Russ.).

7. Zaikanov IN, Zaikanova EV, Buldakova IA. *Geoehkologicheskij i landshaftno-ehkologicheskij analiz territorij sushchestvuyushchikh svalok TBO Moskovskoj oblasti*. In: Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (31.03 – 1.04.2022). Moscow: "GeoInfo"; 2022. P. 65–70. (In Russ.).

8. Hill K, Henderson G. *Pond Urbanism: Floating Urban Districts on Shallow Coastal Groundwater*. WCFS2020. Lecture Notes in Civil Engineering; 2021;158:23–42. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2256-4_2

9. Luoma S, Okkonen J. Impacts of future climate change and Baltic Sea level rise on groundwater recharge, groundwater levels, and surface leakage in the Hanko aquifer in southern Finland. *Water (Switzerland)*. 2014;6(12):3671–3700. https://doi.org/10.3390/w6123671

10. Krogulec E, Małecki J, Porowska D, Wojdalska A. Assessment of Causes and Effects of Groundwater Level Change in an Urban Area. *Water*. 2020;12(11):3107. https://doi.org/10.3390/w12113107

11. Gridnevskij AV. Numerical simulation of the filtration process in the right-bank of the river Don for protection the buildings against rise of groundwater in the city of Rostov-on-Don. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019;9(1):150–163. (In Russ.).

12. Vázquez-Suñé E, Carrera J, Tubau I, Sánchez-Vila X, Soler A. An approach to identify urban groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2010;14(10):2085–2097. https://doi.org/10.5194/hess-14-2085-2010

13. Yao Y, Zhang M, Deng Y, Dong Y, Wu X, Kuang X. Evaluation of environmental engineering geology issues caused by rising groundwater levels in Xi'an, China. *Engineering Geology*. 2021;294. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106350

14. Allocca V. Silvio C., Pantaleone De V., Raffaele V. Rising groundwater levels and impacts in urban and semirural are around Naples (southern Italy). Rendiconti Online Societa Geologica Italiana. 2016;41:14–17. http://dx.doi.org/10.3301/ROL.2016.81

15. Locatelli L, Mark O, Mikkelsen PS, Arnbjerg-Nielsen K, Deletic A, Roldin M, Binning JP. Hydrologic impact of urbanization with extensive stormwater infiltration. *Journal of Hydrology*. 2017;544: 524–537.https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.030

16. La Vigna F. Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeol J*. 2022;30:1657–1683. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1

17. Ogorodnikova E.N., Nikolaeva S.K. *Izmenenie geologicheskoj sredy pod vozdejstviem massivov tekhnogennykh gruntov – otkhodov promyshlennogo proizvodstva*. In: Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (22.03.2028). Moscow: RUDN; 2018. P. 137–142. (In Russ.).

18. Yihdego Y, Danis C, Paffard A. Groundwater engineering in an environmentally sensitive urban area: Assessment, landuse change/infrastructure impacts and mitigation measures. *Hydrology*. 2017;4(3). https://doi.org/10.3390/hydrology4030037

19. Kilin IY. *Vliyanie novogo stroitel'stva na podtoplenie g. Permi*. In: Osipova V.I., editors. Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (02.04. – 04.04.2019). Sbornik nauchnykh trudov pod red. Perm: Perm State University; 2019. 21:190–195. (In Russ.).

20. Privalenko VA, Bezuglova OS. Ecological problems of anthropological landscapes in the Rostov region. *Ecology of Rostov-on-Don*. Volume 1. Rostov-on-Don: SKNTS VSH Publishing House; 2003. 290 p. (In Russ.).

21. Merkulova KA. *Inzhenerno-geologicheskie usloviya g. Rostova-na-Donu*. Rostov-on-Don: RGPU; 2006. 132 p. (In Russ.).

22. Gridnevskij AV. *Imitacionnoe gidrogeologicheskoe modelirovanie pri poiske reshenij reabilitacii tekhnogenno-narushennogo rezhima gruntovykh vod g. Rostova-na-Donu.* In: Osipova V.I., editors. Materialy godichnoj sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoehkologii, inzhenernoj geologii i gidrogeologii (02.04. – 04.04.2019). Sbornik nauchnykh trudov pod red. Perm: Perm State University; 2019. 21:162–172. (In Russ.).

23. Červeňanská M, Baroková D, Šoltész A. Rye Island, 2010: Impact of the flooding on the groundwater level. *Pollack Periodica*. 2021;16(3):70–75. https://doi.org/10.1556/606.2021.00357

24. Chiang WH, Kinzelbach W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Berlin: Springer; 2000. 342 p.

25. Barnett B, Townley LR, Post V, et al. *Australian Groundwater Modelling Guidelines, Waterlines report*. Canberra: National Water Commission; 2012. 203 p.

26. Wels C, Geo P, Mackie D, Scibek J. *Guidelines for Groundwater Modeling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities*. *Report No. 194001*. Canada: Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting Inc. 2012. 385 p.

27. Tkachenko IG, Shatokhin AA, Geras'kin VG, Kislun AA. Automated System Designed for Collection and Transfer of Data from Hydrogeological Observation Wells. *Automation and Informatization of the fuel and energy complex*; 2013;5:18–22. (In Russ.).

Об авторе:

Гридневский Александр Викторович, доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ORCID, a328@ya.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023.
Поступила после рецензирования 10.04.2023.
Принята к публикации 11.04.2023.

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Alexander V Gridnevsky, associate professor of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344003), Cand.Sc. (Geology and Mineralogy), associate professor, ORCID, a328@ya.ru

Received 20.03.2023.
Revised 10.04.2023.
Accepted 11.04.2023.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of the manuscript.